

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Moderní technologie výroby desek plošných spojů
Modern Technology of Printed Circuit Boards Production

2013

Radek Caga

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Caga**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma: **Moderní technologie výroby desek plošných spojů**
Modern Technology of Printed Circuit Boards Production

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rozbor technicko-ekonomických požadavků na výrobu desek plošných spojů.
2. Proved'te roztřídění technologií výroby desek plošných spojů a vysvětlete jejich charakteristické rysy.
3. V návaznosti na předchozí technologie klasifikujte materiály pro jejich výrobu a analyzujte jejich vlastnosti.
4. Podrobně analyzujte vybranou technologii dle specifikace vedoucího práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle specifikace vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. května 2013



podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu prof. Ing. Petru Chlebiši CSc., za odbornou pomoc, vedení a cenné rady, které mi pomohly ke zpracování této bakalářské práce.

Abstrakt

V dnešní době představují plošné spoje nezbytnou součást každého zařízení. Tato bakalářská práce se zabývá problematikou právě plošných spojů, jejichž správný návrh je čím dál tím důležitější. Hlavním cílem této práce je zaměření na správný návrh DPS, na který se dá poohlížet jak ze stránky technologické, tak i ze stránky ekonomické. Moderní technologie jsou směřovány na oblast povrchové montáže SMT, proto je zde těmto moderním technologiím věnovaná podstatná část obsahu. Je zde také uveden výčet technologií pro tvorbu vodivých obrazců se stručnou charakteristikou a aplikace vhodných materiálů v závislosti právě na těchto technologiích.

Klíčová slova

Deska plošných spojů, subtraktivní technologie, SMT, technicko-ekonomické požadavky, spolehlivost, moderní technologie, konstrukční parametry.

Abstract

Printed circuit boards form an integral part of each device in present time. This thesis describes in full a questions of printed circuit boards, whose correct proposal is more and more important. The principal aim of this thesis is focused on the accurate proposal of PCB, namely from technical aspects and also from economical aspects. Modern technologies tend to the surface mounting SMT, therefore these technologies make a main part of the contents. There is also a list of technologies for the production of conductive patterns with brief characteristic and with application of appropriate materials based on these technologies.

Key Words

Printed circuit boards, subtractive technology, SMT, technical and economic requirements, reliability, advanced technology, structural parameters.

Seznam použitých symbolů a zkratk

AlN	Novější neorganický materiál pro DPS - Aluminium - Nitrid
C _b [F]	Kapacita kondenzátoru u ochrany MOSFET Tranzistorů
CEM	Materiál DPS určitých parametrů (CEM-1; CEM-3)
COB	(Chip On Board) Čip na desce (technologie spadající pod povrchovou montáž)
C _{GD}	Parazitní kapacita unipolárního tranzistoru mezi elektrodami Gate a Drain
Epox	Epoxidová pryskyřice – druh pojiva u určitých druhů materiálů
Fenol	Fenolformaldehydová pryskyřice - druh pojiva u určitých druhů materiálů
FR	(Flame Resist) Materiál DPS určitých parametrů (FR-2 ÷ FR-6)
DPS	Deska Plošných Spojů
EMC	(Electromagnetic Compatibility) Elektromagnetická kompatibilita
G-11	Materiál DPS určitých parametrů
GPO	Materiál DPS určitých parametrů
HAL	(Hot Air Levelling) Žárové nanesení pájky na DPS
HCMOS	Řada integrovaných obvodů technologie CMOS
HDI	(Hight Density Interconnection) Technologie propojování vrstev DPS
IGBT	(Insulated Gate Bipolar Transistor) Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
IKW75N60T	Označení IGBT tranzistoru
MELF	(Metal Electrode Face Komponent) Válcové pouzdro SMD součástek
MINIMELF	Válcové pouzdro SMD součástek
MOSFET	Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor
NEMA	(National Electrical Manufactures Association) Označení materiálů pro DPS
PES	Polyesterová pryskyřice - druh pojiva u určitých druhů materiálů
PLCC	(Plastic Leaded Chip Carrier) Plastové pouzdro čtvercového typu SMD součástek
Q	Činitel jakosti cívky
QFP	Pouzdro SMD součástek
RoHS	(Restriction of Hazardous Substances) Směrnice EU pro používání omezeného množství toxických látek a látek nebezpečných pro životní prostředí
SMD	(Surface Mount Device) Součástky pro povrchovou montáž
SMT	(Surface Mount Technology) Technologie povrchové montáže
SOD	(Small Outline Diode) Diodové pouzdro pro povrchovou montáž
SOP	(Small Outline Package) Pouzdro integrovaných obvodů pro povrchovou montáž

SOT	(Small Outline Transistor) Tranzistorové pouzdro pro povrchovou montáž
SSD	(Solid Solder Deposit) Technologie pokovování DPS
TCE	Činitel tepelné roztažnosti
T _g	Teplota skelného přechodu
t _{off} [s]	Doba vypnutí spínacího prvku
U _L [V]	Napětí na indukčnosti
UV	Ultrafialové záření
XXXPC	Materiál DPS určitých parametrů
YAG	(Yttrium Aluminium Garnet) Druh laseru pro tvorbu malých otvorů do DPS

Obsah

Úvod.....	9
1. Technicko-ekonomické požadavky na výrobu desek plošných spojů.....	10
1.1. Vrstvy desek plošných spojů.....	10
1.2. Výběr součástek a jejich rozmístění.....	11
1.3. Doporučení pro zajištění nízkých nákladů na výrobu DPS.....	12
1.4. Pravidla pro snadnou montáž DPS a správnou funkci zařízení.....	12
1.5. Zemnění, parazitní indukčnosti a filtrační kondenzátory na DPS.....	12
1.5.1. Způsoby zemnění	12
1.5.2. Filtrační a lokální kondenzátory.....	13
1.5.3. Plošné cívky	14
1.5.4. Vliv parazitní indukčnosti na výkonové spínací obvody	14
1.6. Návrh obvodů hodinových impulzů.....	15
1.7. Tvar a rozměry plošných spojů	16
1.7.1. Tloušťka a velikost DPS	16
1.7.2. Multipanel	16
2. Technologie výroby desek plošných spojů a jejich charakteristické vlastnosti	18
2.1. Plošné spoje a jejich základní rozdělení.....	18
2.2. Subtraktivní metoda výroby DPS.....	19
2.2.1. Technologický postup před vytvořením samotného obrazce	19
2.2.2. Vytvoření obrazce a nanesení fotocitlivé vrstvy	20
2.2.3. Leptání a technologický proces před nanesením nepájivé masky.....	20
2.2.4. Nepájivá maska	21
2.2.5. Povrchová úprava.....	21
2.3. Aditivní metoda výroby DPS	21
2.4. Vysoká hustota propojení u vícevrstvých DPS	22
3. Materiály pro výrobu DPS a jejich vlastnosti	23
3.1. Konstrukční parametry a vlastnosti materiálů DPS	23
3.1.1. Elektrické vlastnosti DPS.....	24
3.1.2. Elektrické vlastnosti kresby DPS	24
3.1.3. Mechanické vlastnosti.....	25
3.1.4. Tepelné vlastnosti.....	26
3.2. Materiály pro výrobu DPS	27
3.2.1. Materiály na organické bázi	28

3.2.2.	Materiály na neorganické bázi	29
4.	Technologie povrchové montáže SMT	30
4.1.	Charakteristika SMT technologie	30
4.2.	Technologické požadavky kladené pro návrh DPS pro SMT z výrobního a ekonomického pohledu	31
4.2.1.	Pájecí plošky	31
4.2.2.	Vzájemné vzdálenosti součástek	33
4.2.3.	Izolační mezery mezi plošnými spoji a průchozí otvory	33
4.3.	Moderní technologický postup osazování SMD součástek	34
4.3.1.	Nanášení pájecí pasty na DPS	34
4.3.2.	Nanášení lepidla na DPS	35
4.3.3.	Automatické osazování SMD součástek	36
4.4.	Metody a moderní technologie pájení	36
4.4.1.	Pájení vlnou	36
4.4.2.	Pájení přetavením	37
	Závěr	41
	Seznam použité literatury	42

Úvod

V posledních dvou desetiletích došlo na celosvětovém trhu k velkému rozvoji techniky. Základní stavební jednotkou každého výrobku je deska plošného spoje. Nároky na její výrobu jsou postupem času čím dál tím přísnější. Proto dochází nejen k vývoji nových technologií, ale také k inovování technologií již osvědčených. Neustálý vývoj má zajistit rychlou vyrobiteľnosť, vysokou spoľahlivosť, minimalizáciu rozmerů, čo zväčšuje technologickú a ekonomickú náročnosť. Součástky povrchové montáže mají v dnešní době miniaturní rozměry včetně vývodů, které mají velikost řádově až v desetinách milimetrů. Plošné spoje mají velmi hustou kresbu a počet vrstev, otvory propojující jednotlivé vrstvy mají průměr několik stovek mikrometrů. Jelikož se v důsledku toho stupňují požadavky na přesnost ve všech možných oblastech výroby od samotného návrhu DPS až po zapájení součástek, je nutné počítat s desítkami pravidel a kritérií, která pro úspěšnou realizaci jsou nezbytná. Mnohdy toto souvisí také s technologiemi jednotlivých úkonů (vrtání, vytvoření vodivého obrazce, osazování, pájení, apod.), nebo s použitým materiálem. Nejsou to jen technické, ale také ekonomické požadavky, na které je potřeba klást velký důraz. Volba kompromisního řešení mezi technickými a ekonomickými vlastnostmi hraje velkou roli a je potřeba se jí věnovat detailněji. V nenáročných aplikacích by cena narostla zbytečně, protože každý produkt nevyžaduje příliš přísná kritéria, některé aplikace je naopak vyžadují, a proto není možné zanedbávat podstatné náležitosti. V této bakalářské práci je tento problém z velké části rozebrán a popsán tak, aby technicko-ekonomické požadavky byly na úměrné úrovni vůči dané aplikaci.

1. Technicko-ekonomické požadavky na výrobu desek plošných spojů

Jelikož náročnost výroby DPS má vzestupnou tendenci, je nutné zaměřit se na technické požadavky pro její výrobu. Ne vždy je potřeba klást velký důraz na všechny technické požadavky, ale je důležité umět vybrat ty podstatné (v závislosti na aplikaci apod.) a na ty se zaměřit detailněji. Za účelem snížení nákladu výroby DPS je nutné zabývat se také ekonomickou stránkou výrobního procesu. Vyrobit DPS s ohledem na technicko-ekonomické požadavky je myšleno vyrobit ji tak, aby odpovídala všem požadovaným technickým náležitostem, ale zároveň, aby náklady na její výrobu a osazení enormně nenarostly. Cena výsledného zařízení je z technologického hlediska závislá na použitých materiálech, ale také na době celého výrobního procesu. Trendem moderní doby je navrhovat DPS tak, aby při její výrobě byly maximálně a efektivně využity technologické možnosti výrobce.

1.1. Vrstvy desek plošných spojů

Na začátku samotného návrhu DPS je nutné pečlivě uvážit vhodný počet vrstev. Parametry ovlivňující počet vrstev jsou: rozměr desky, systém sběrnicí, počet součástek, systém napájení, počet uzlů a šumová imunita. Vrstvy plošných spojů se podle jejich funkce dělí na 3 základní typy:

- Microstrip – vnější signálové vrstvy. Tyto vrstvy mají nižší přenosové zpoždění, protože mají nižší parazitní kapacitu v porovnání s vrstvami Stripline.
- Stripline – vnitřní signálové vrstvy, které by měly sousedit s vodivými plochami. Jelikož tyto vrstvy sousedí s vodivými plochami, tak mají vyšší odolnost proti rušení, neboť jsou jimi stíněny.
- Plane – vodivé plochy pro rozvod napájení.

Pro řazení vrstev platí pravidlo [6]:

„Každá signálová vrstva musí sousedit s vodivou plochou, nejlépe se společným vodičem“

Jelikož každá DPS je unikátní a musí její návrh zahrnovat řadu náležitostí a pravidel, které mají zásadní vliv na funkci, spolehlivost a v neposlední řadě také výrobní náklady. Tabulka 1.1 uvádí doporučené řazení vrstev vícevrstvých DPS.

U dvouvrstvých DPS je dobré vést všechny signálové spoje a kladné napájení po straně součástek (TOP). Stranu BOTTOM lze efektivně využít pro společný vodič GND jako vodivou plochu, na které se ojediněle mohou vyskytnout krátké signálové můstky. Napájení je v krajním případě možné vést na stejné straně jako společný vodič GND, ovšem je nutné v co největší míře minimalizovat proudové smyčky [4], [6].

Tabulka 1.1 – Příklad správného řazení vrstev pro vícevrstvé desky plošných spojů [6]

Vrstvy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	komentář
2 vrstvy	S1	S2									pouze pro návrh nenáročných a pomalých aplikací
4 vrstvy (2 spojové)	S1	G	P	S2							nízká impedance napájení kritické spoje pouze do S1
6 vrstev (4 spojové)	S1	G	S2	S3	P	S4					vysoká impedance napájení kritické spoje pouze do S1
6 vrstev (4 spojové)	S1	S2	G	P	S3	S4					nízká impedance napájení kritické spoje pouze do S2
6 vrstev (3 spojové)	S1	G	S2	P	G	S3					kritické spoje do S1, S2 i S3 S2 má vyšší přenosové zpoždění
8 vrstev (6 spojových)	S1	S2	G	S3	S4	P	S5	S6			vysoká impedance napájení kritické spoje pouze do S2 a S3
8 vrstev (4 spojové)	S1	G	S2	G	P	S3	G	S4			doporučeno pro EMC
10 vrstev (6 spojových)	S1	G	S2	S3	G	P	S4	S5	G	S6	doporučeno pro EMC S4 je citlivá na napájecí šum
S = signálová vrstva P = napájení G = společný vodič (zem)											

1.2. Výběr součástek a jejich rozmístění

V dnešní době je na trhu velké množství součástek. Součástky se také integrují do větších „celků“, přičemž se zvyšuje nejen výkonnost, ale také spolehlivost celé výroby. Pro správné využití a výběr součástek je vhodné dodržovat následující pravidla:

- Pokud to není nutné, tak nepoužívat různé typy (elektrické parametry, pouzdra, atd.) součástek. Při dodržení tohoto pravidla se zlepší ekonomické požadavky na výrobu:
 - Jednodušší manipulace se součástkami ve skladu.
 - Zkrácení výrobní doby zařízení.
 - Snazší osazování DPS (ručně i automaticky)
 - Při odběru velkého počtu součástek lze využít množstevní slevy.
- Používat ty součástky, které je možné osazovat automatickým osazovacím zařízením, dovolují-li to technologické možnosti výrobce.
- Používat co nejvíce SMD součástek, pokud to ovšem nemá negativní vliv na funkci a spolehlivost daného zařízení.
- Směr rozmístění součástek by měl směřovat od vysokofrekvenčních po nízkofrekvenční.
- Vzdálenost mezi součástkami by měla být co nejmenší, aby proudové smyčky byly co nejmenší a signálové spoje co nejkratší.
- Součástky funkčních bloků by měly být rozmístěny u sebe.
- U integrovaných logických obvodů nepoužívat zbytečně rychlé součástky z důvodu minimalizace vyšších složek harmonických v kmitočtovém spektru [4], [6].

1.3. Doporučení pro zajištění nízkých nákladů na výrobu DPS

Jelikož deska plošného spoje bývá v řadě elektronických zařízení jeho nejdražší součástí, je nezbytné dodržovat určitá pravidla tak, aby náklady na výrobu DPS nebyly zbytečně velké. Za účelem snížení nákladů se doporučují tyto pravidla:

- Počet vrstev výrazně ovlivňuje cenu zařízení a jeho spolehlivost, proto se doporučuje používat co nejmenší přípustný počet vrstev.
- Počet různých otvorů v desce by měl být minimální.
- Výběr správného základního materiálu je velmi důležitý, a proto v něm musí být zohledněna řada náležitostí týkající se technologie výroby apod.
- DPS by měla mít optimální tvar, který je úměrný její náročnosti. Deska by neměla být zbytečně velká, neboť při pájení vlnou by mohly vzniknout problémy, spojené s její deformací [4].

1.4. Pravidla pro snadnou montáž DPS a správnou funkci zařízení

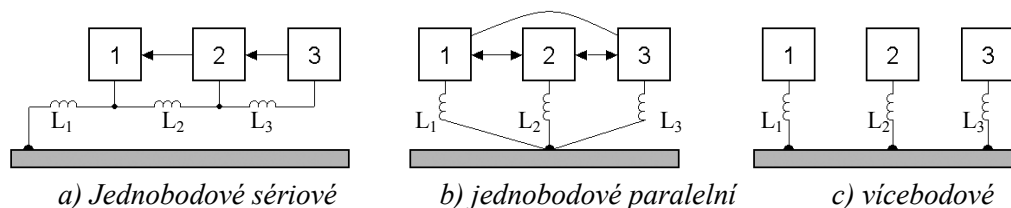
- Šířka vodivých cest i velikost izolačních mezer musí být uzpůsobeny jak technickým možnostem výrobce, tak elektrickým parametrům signálů na desce.
- Musí být dodržena správná geometrie pájecích plošek, stejně tak jako jejich rozměry. Existuje normalizovaná řada rozložení kontaktů, kterou už podporují softwarové programy pro návrh DPS. Konstruktor musí pájecí plošky navrhnout tak, aby negativně neovlivnil chod zařízení. V případě SMT je potřeba brát v úvahu tolerance pouzder jednotlivých součástek a technologii pájení.
- Vzdálenosti mezi jednotlivými součástkami musí být dostatečně velké, aby byla možná jejich případná výměna.
- Orientační značky musí být umístěny na DPS tak, aby vyhovovaly všem montážním operacím. Všechny stroje montážní linky musí být s těmito značkami kompatibilní.
- Vodivé cesty by neměly mít ostré rohy s úhlem 90° , neboť při odleptávání dochází k podleptávání rohů a v důsledku toho se pak změní impedance. Doporučený úhel je 45° .
- U dlouhých paralelních signálových spojů je nutné brát v úvahu tzv. přeslechy. Pro obvody HCMOS se maximální délka signálových spojů udává okolo 13cm. Tato vzdálenost může být navýšena v případě, že se vzájemná vzdálenost signálových spojů zvětší nebo umístěním společného vodiče mezi signálové spoje.
- U výkonových spínacích obvodů je nutné volit dostatečně velkou šířku spoje s co možná největší tloušťkou měděné fólie cca $70\mu\text{m}$ [4], [6].

1.5. Zemnění, parazitní indukčnosti a filtrační kondenzátory na DPS

1.5.1. Způsoby zemnění

Způsoby zemnění mají celkem podstatný vliv na správný chod zařízení, proto je dělíme na tři kategorie, podle kterých se pak aplikují v praxi:

- a) Jednobodové (sériové a paralelní)
- b) Vícebodové



Obr. 1.1 – Způsoby zemnění [6]

Všechny způsoby zemnění jsou znázorněny na obr. 1.1. Indukčnosti v jednotlivých zapojeních jsou parazitní indukčnosti, kde hodnoty těchto indukčností se pohybují okolo 10nH/cm (pro plošný spoj o šířce 0,3mm a tloušťce 45 μm – 4. třída přesnosti). Bloky 1, 2 a 3 jsou buď samotné součástky nebo funkční celky. **Jednobodové** zemnění je vhodné použít pro stejnosměrné aplikace nebo pro střídavé aplikace, které pracují s nízkým kmitočtem. Pro správnou volbu sériového nebo paralelního zemnění je nutné znát funkci obvodu a rozložení významných proudů. **Jednobodové paralelní** zapojení se používá pro takové obvody, jejichž proudy (tekoucí indukčnostmi L_1 , L_2 a L_3) jsou přibližně stejné a všechny funkční bloky zpracovávají signály stejné úrovně. **Jednobodové sériové** zapojení se používá nejčastěji tam, kde v signálovém vedení postupně narůstá signál. Pro obvody pracující s velmi vysokou frekvencí je dobré použít **vícebodové zemnění**. Princip tohoto zemnění spočívá v tom, že všechny součástky jsou co nejkratším příívodem připojeny na nízko impedanční vodivou plochu (tzv. „rozlévaná měď“), která může být realizovaná na DPS i samotnou zemnicí vrstvou.

Při používání většího počtu součástek a integrovaných obvodů dochází k „přerušování“ vodivé plochy GND, neboť na desce se vyskytuje spousta otvorů. Pokovené otvory „narušují“ souvislou vrstvu a to především svou izolační mezerou, která musí být pokud možno zvolena tak, aby nedocházelo ke zkratům mezi vodivou cestou a souvislou vrstvou a současně, aby u integrovaných obvodů bylo možno protáhnout cesty mezi jednotlivými vývody. Pokud se tato podmínka nedodrží, je nutné plošné spoje prodloužit a v důsledku toho se pak parazitní indukčnosti zvětší. Literatura [6] označuje tuto chybu jako tzv. syndrom Švýcarského sýra. [4], [6].

1.5.2. Filtrační a lokální kondenzátory

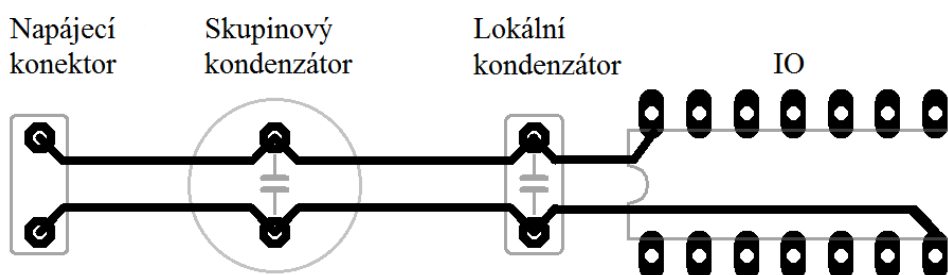
Jelikož logické obvody a hlavně mikroprocesory jsou poměrně rychlé a napájecí zdroje bývají umístěné relativně daleko, je potřeba napájení tzv. blokovat. K realizaci blokování napájení se používají kondenzátory. Filtrační kondenzátor se nachází v blízkosti napájecího zdroje a slouží jako širokopásmový filtr. V blízkosti IO a mikroprocesorů se vyskytují dva kondenzátory, které jsou řazené paralelně (obr. 1.2). Skupinový kondenzátor se vyznačuje poměrně velkou kapacitou, obvykle je elektrolytický. Lokální kondenzátor (keramický) obvykle má oproti elektrolytu sice menší kapacitu, ale za to výrazně lepší vysokofrekvenční vlastnosti. Vodivé cesty jsou vedeny „uvnitř“ IO, což minimalizuje proudové smyčky a parazitní indukčnost v obvodu. Průchodu signálu vodivou cestou je asi 0,1ns/cm. Vzdálenosti je obvykle nutné minimalizovat, protože lokální kondenzátor musí být umístěn co nejblíže napájecím vývodům, někdy, pokud je to možné se umísťuje přímo na vývody (např. pod pouzdro).

Pokud bude obsahovat DPS běžný mikroprocesor a lokální kondenzátor bude umístěn pouhých 5cm od čipu, vznikne spoj délky asi 15 cm. Na této délce bude parazitní indukčnost

několik desítek až stovek nH (nutno připočíst také parazitní indukčnosti kontaktů) a odpor několik desítek mΩ. Celkový úbytek napětí lze pak vyjádřit podle vztahu:

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt} \text{ [V; H, A, s]}$$

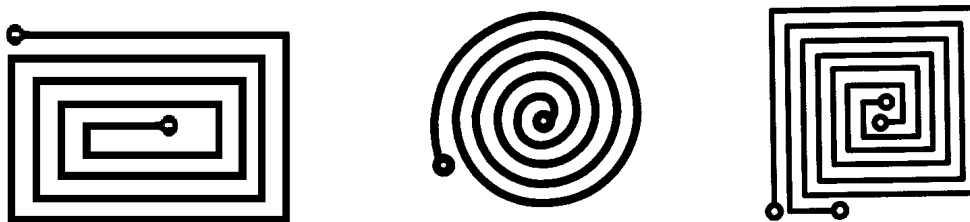
Po výpočtu je toto napětí v řádu jednotek V, což je nepřijatelné, neboť hodnota převyšuje jak maximální toleranci napájecího napětí, tak i šumovou imunitu. Podlitím spojů vodivou plochou se indukčnost sníží asi o 50%. Pokud umístění lokálního kondenzátoru do těsné blízkosti IO není možné, tak jej lze umístit na protilehlou stranu DPS v SMD provedení [6].



Obr. 1.2 – Správné řazení Filtračního a Lokálního kondenzátoru na DPS [6]

1.5.3. Plošné cívky

Plošné cívky lze na plošném spoji realizovat s max. indukčností asi 10 μH. Činitel jakosti cívky Q je závislý na šířce vodiče, na mezerách mezi vodiči, na tvaru cívky a na základním materiálu. Cívky s pravoúhlými spoji mají větší indukčnost než cívky kulaté. Výhoda u kulatých cívek je vyšší činitel jakosti Q, který v praktických aplikacích dosahuje hodnot 50 až 150 při frekvenci 100 MHz. Ukázky plošných cívek znázorňuje obr. 1.3 [4].



Obr. 1.3 – Provedení plošných cívek [4]

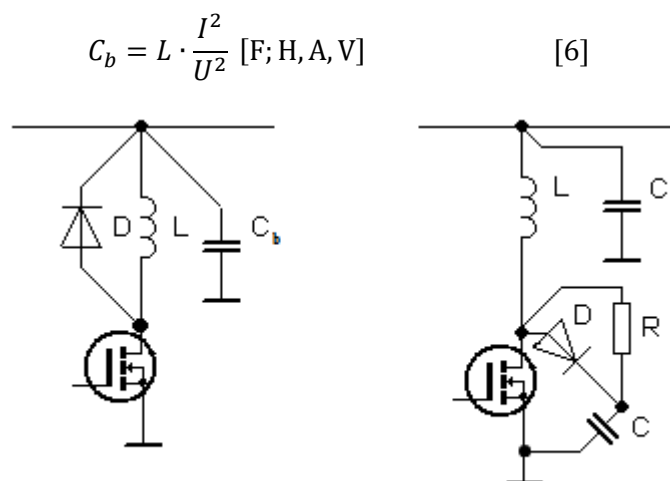
1.5.4. Vliv parazitní indukčnosti na výkonové spínací obvody

U výkonových spínacích obvodů se vliv parazitních indukčností projevuje podstatně více než u analogových obvodů. Parazitní indukčnost samotných součástek se dá eliminovat vhodným zapojením do obvodu, ale parazitní indukčnost plošných spojů lze snížit pouze správným návrhem DPS. Součástky typu IGBT jsou velmi rychlé, spínají ve stovkách ns poměrně velké proudy (desítky až stovky Ampér), pak vliv těchto indukčností nelze v žádném případě zanedbat. Např. je-li uvažován IGBT tranzistor typu IKW75N60T, který má parametry:

$I_C = 80\text{A}$, $T_{off} = 330\text{ns}$ při parazitní indukčnosti plošného spoje 10nH/cm , pak pro výpočet úbytku napětí na této indukčnosti lze využít vztah:

$$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt} = 10^{-8} \cdot \frac{80}{330 \cdot 10^{-9}} = \frac{80}{33} = 2,42\text{ V}$$

Z výpočtu je zřejmé, že na každém centimetru DPS bude úbytek napětí $U_L = 2,42\text{ V}$. Tranzistory typu MOSFET mají ve své struktuře obsaženou parazitní kapacitu C_{GD} (mezi elektrodami Gate a Drain), která má negativní vliv na dočasné zvýšení napětí U_{GS} . Při zvýšení napětí U_{GS} by mohlo dojít k přetížení tranzistoru a jeho nedokonalému sepnutí. Pro praktické aplikace se tedy doporučuje budič tranzistoru umístit do blízkosti spínacího prvku (max. asi $1'' - 2''$). Parazitní indukčnost způsobuje při vypnutí tranzistoru napěťový překmit, který může způsobit rušení v obvodu. Na *obr. 1.4* jsou znázorněny možné způsoby, jak lze MOSFET tranzistory chránit proti těmto překmitům. Kondenzátor C_b musí být navržený tak, aby tyto překmity pohltil. Pro správný návrh kapacity kondenzátoru C_b platí následující vztah. Po provedení výpočtu je dobré kapacitu kondenzátoru C_b o jeden řád předdimenzovat [6], [7].



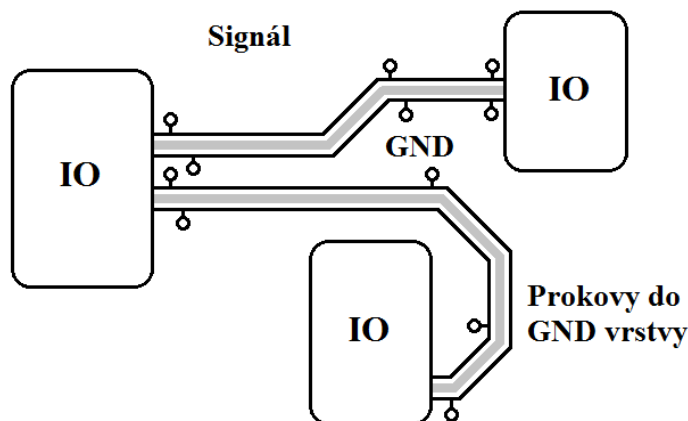
Obr. 1.4 – Zapojení možných ochran MOSFET tranzistorů [6]

1.6. Návrh obvodů hodinových impulsů

Potenciálně největším zdrojem rušení na DPS jsou obvody hodinových impulsů, které pracují s velmi vysokými frekvencemi a také s velkou strmostí náběžných a sestupných hran. Pro takto náročné obvody jsou základní pravidla návrhu rozšířená na několik dalších, která mají za úkol problémy odstranit:

- Vzájemná fyzická separace od ostatních obvodů, neboť potenciální hrozbu tvoří jejich vzájemná elektromagnetická vazba, ta pak může mít negativní vliv na chod hodin.
- Součástky vkládat do DPS bez patic.
- Všechna kovová pouzdra je nutné uzemnit.
- Konektory vyvádějící hodinové impulsy mimo DPS je nutné impedančně přizpůsobit.
- Lokální GND plochou nesmí být vedeny žádné spoje (signálové).
- Kovová pouzdra součástek je dobré připojit na lokální plochu GND.

- Kritické signálové spoje by měly být obklopeny tzv. ochrannými paralelními spoji. Vrstva GND by měla být nejbližší vrstvě s kritickými signálovými spoji a ochranné paralelní spoje by měly být na tuto vrstvu vodivě propojeny. Toto řešení omezuje tzv. přeslechy, ale hlavně dokáže zabezpečit konstantní impedanci kritických spojů. Na obr. 1.5 je znázorněno možné řešení těchto ochranných spojů [4], [6].



Obr. 1.5 – Ochranné paralelní spoje [6]

1.7. Tvar a rozměry plošných spojů

Mezi požadavky na výrobu a spolehlivost zařízení patří návrh správného tvaru a rozměrů DPS. Při nesprávném návrhu mohou vzniknout problémy při výrobě v oblasti nanášení pájecí pasty, pájení nebo osazování. Nevhodně zvolenými parametry se cena může výrazně prodražit nebo spolehlivost podstatně snížit.

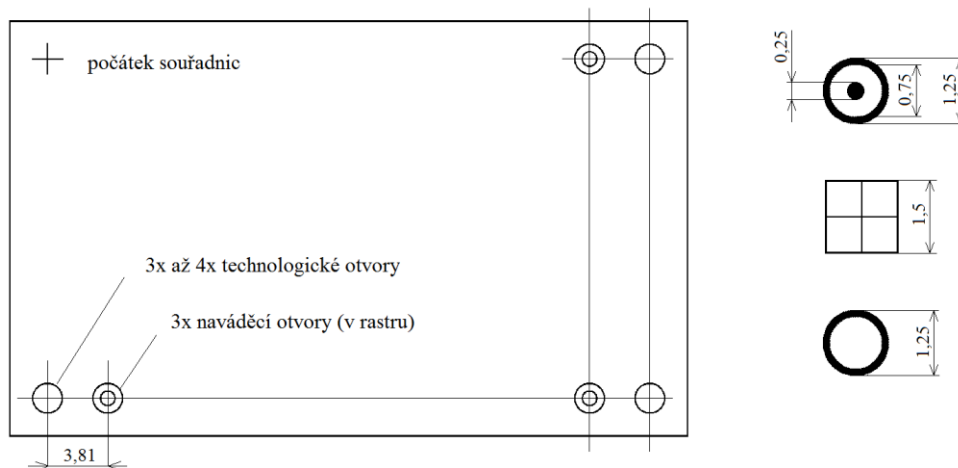
1.7.1. Tloušťka a velikost DPS

Mezi tloušťkou a velikostí DPS je určitý poměr, který je dobré brát v úvahu. V případě rozměrově velkých desek s malou tloušťkou může při provozu dojít k její rezonanci vlivem otřesů. Při pájení vlnou se deska prohýbá při ohřevu. Čím je deska rozměrově větší a její tloušťka menší, pak je toto prohnutí větší a může způsobit řadu problémů. Pokud realizace DPS je prováděná tzv. multipanelem, je toto riziko vyšší, protože deska je do značné míry „oslabená“. Při návrhu malých desek se nedoporučuje používat tenký laminát, neboť při ručních opravách je materiál lokálně přehříván a může dojít k delaminaci měděné fólie. Tloušťky DPS se vyrábějí o rozměru: 0,2 – 0,5 – 0,7 – 0,8 – 1,0 – 1,2 – 1,5 – 1,6 – 2,0 – 2,4 – 3,2 – 6,4 mm [1], [4].

1.7.2. Multipanel

Multipanel obsahuje několik stejných motivů DPS, které se na konci výrobního procesu oddělí. Důvodem používání multipanelu je snadnější a rychlejší výrobní proces DPS. Pro snadné oddělení motivů od multipanelu je potřeba materiál na spojích lokálně oslabit, aby následné oddělení od multipanelu bylo jednoduché a rychlé. Jedna ze dvou nejvíce používaných možností je vyfrézování drážky mezi jednotlivými motivy, přičemž jednotlivé motivy jsou upevněny k multipanelu v několika malých bodech. Druhá možnost spočívá v tom, že po celé délce desky (případně i šířce) je tenká drážka z obou stran, v níž je celá deska lokálně oslabená.

Mezi nejpřísnější požadavky pro multipanely jsou tzv. polohovací značky a otvory. Tyto značky se vkládají na okraje multipanelu, ve vzdálenosti 3,8 až 10 mm od kresby plošného spoje a musí být umístěny v rastru. Příklad umístění těchto značek znázorňuje *obr. 1.6*. Důvody, proč jsou na tyto značky kladeny tak přísné požadavky, jsou takové, aby deska byla „kompatibilní“ s moderními technologickými stroji [1], [4].



Obr. 1.6 – Naváděcí otvory a značky na DPS [4]

2. Technologie výroby desek plošných spojů a jejich charakteristické vlastnosti

Před tím, než se začaly používat DPS, spočívala montáž v elektronice upevňováním jednotlivých součástek na tzv. šasi, což byl kovový nosič. Mezi nosiči se propojení dělalo pomocí drátových spojů. Po ukončení aplikací s vakuovými elektronkami musela přijít změna, protože součástky se značně zminiaturizovaly a složitostí zařízení výrazně stouply, proto se zavedla technologie právě plošných spojů. V současnosti vytváření vodivého obrazce na DPS je prováděno několika metodami. Existují dva základní způsoby, jak vytvořit vodivý obrazec. Jedním z nich je aditivní proces, kde se samotná vodivá cesta nanáší na nevodivý základní materiál. Druhou možností je subtraktivní metoda, která funguje na principu odebrání části měděné vrstvy tak, aby zůstal zachovaný pouze vodivý obrazec. Subtraktivní technologie vychází z principů aditivní a subtraktivní technologie [5].

2.1. Plošné spoje a jejich základní rozdělení

Hlavním charakteristickým rysem plošných spojů je montáž na izolační podložce, přičemž vodivé spojení součástek zajišťují plošné vodiče. Podle konstrukce a použité technologie se plošné spoje dají rozdělit do několika skupin.

Plošné spoje z konstrukčního hlediska je možné rozdělit na:

- neohebné a ohebné
- kombinované (tuhé a ohebné)
- podle počtu vrstev:
 - jednovrstvé
 - dvouvrstvé - s pokovenými nebo s nepokovenými otvory
 - vícevrstvé – zpravidla s pokovenými otvory
- speciální

Pro výrobu plošných spojů používáme metody:

- Subtraktivní – princip spočívá v odebrání části vodivé vrstvy, aby vznikl potřebný vodivý obrazec.
- Aditivní – princip spočívá v nanášení vodivých cest.
- Semiaditivní – jako výchozí materiál pro tuto metodu je neplátovaný materiál (bez měděné fólie). Po úpravě povrchu a vrtání se tento materiál celý pokoví vrstvou mědi asi o tloušťce 5μm. Další postup je obdobný jako u subtraktivní metody.
- laminace (pro vícevrstvé desky)

Funkce desky plošných spojů je:

- Součástkám umístěným na desce poskytuje správné elektrické propojení mezi sebou.
- Rovněž součástkám poskytuje mechanickou „podporu“.
- Zejm. ve složitějších zařízeních jsou na ní označené součástky a jejich vývody.

Výhody plošných spojů:

- vyšší spolehlivost daného zařízení
- zpravidla nižší cena
- nízká hmotnost
- snadná opravitelnost
- efektivní automatizovatelnost výroby
- jednoduché dělení celku na části
- přesné rozmístění součástek a jednoznačná poloha součástek

Nevýhody plošných spojů:

- nízká odolnost vůči vibracím
- nízká odolnost vůči nárazům apod.
- složitá pravidla návrhu
- jistá „investiční náročnost“

[1], [3], [4], [5], [6].

2.2. Subtraktivní metoda výroby DPS

Realizace výroby touto metodou se v celosvětové výrobě používá nejčastěji. Přibližně 90% z celosvětové produkce jsou DPS vyrobeny právě touto metodou. Název metody vychází z anglického slova „subtract“, což v překladu znamená odebrat. Princip této metody tedy spočívá v odebrání části vodivé vrstvy. Odebráním části vodivé vrstvy lze realizovat několika způsoby: frézováním, vrtáním, broušením a chemickými procesy. Výběr z těchto možností je závislý především na složitosti zařízení a na počtu výrobních kusů. Pokud to okolnosti dovolují, je dobré používat desky, které mají měděnou fólii menší než 35 μ m. Vhodné tloušťky fólií jsou např. 17,5; 10 a i 5 μ m. Menší tloušťky fólií snižují míru a riziko tzv. podleptání spoje, ovšem při ručních opravách takto tenkých vrstev (5 μ m) může dojít k delaminaci měděné fólie. Správný technologický postup výroby je: dělení základního materiálu, balení přezů, vyvrtání otvorů, čištění a broušení, pokovení otvorů a zesílení mědi, vytvoření obrazce, nanášení fotocitlivé vrstvy, expozice fotocitlivé vrstvy, vyvolání, retuš a mezioperační kontrola, odstranění organického rezistu, leptání, stripování vrstvy kovového rezistu, nanášení nepájecí masky, závěrečná povrchová úprava, konečné mechanické operace, elektrické testování [1], [3], [4].

2.2.1. Technologický postup před vytvořením samotného obrazce

Dělení základního materiálu je první krok, kterým se obvykle začíná. V dnešní době je tento proces automatizovaný a nahrazuje tak zastaralý způsob ručního dělení základního materiálu. Kromě značné úspory času má tato technologie hlavní výhodu v přesnosti. K tomuto dělení se využívá diamantová pila, na které je potřeba materiál rozdělit na tzv. technologický rozměr. Tento rozměr by měl být po stranách větší asi o 15-20mm vůči finálnímu výrobku. Pro efektivnější výrobu je vhodné využít multipanel, pokud to rozměry umožňují (viz. kapitola 1.7.2). Následně se vrtají otvory na souřadnicové vrtačce, která má 20 000 – 200 000 ot. /min. Pro zrychlení výroby je dobré používat co nejmenší počet průměrů otvorů (resp. počítat s tím při samotném návrhu). Otvory, které se budou následně pokovovat, by měly mít asi o 0,2 mm

větší průměr. V extrémních případech, kdy je hustota plošných vodičů na desce příliš vysoká a je nutné propojit jednotlivé vrstvy, se používají průměry až 0,15 mm. Pro vrtáky, které vrtají tyto extrémní otvory, existují přísná kritéria jako je dokonalá souosost, definovaný tvar špičky apod. V dnešní době je technologie vrtáček natolik vyspělá, neboť umožňuje optickou kontrolu stavu vrtáků. Tolerance těchto strojů je řádově okolo 10 μm. Po vyvrtání všech otvorů následuje proces čištění a broušení. Hlavní úlohou čištění a broušení je dokonale se zbavit všech nečistot z DPS po vrtání. Celý proces je omývaný vodou. Pak následuje odmaštění DPS a pokovení otvorů případně zesílení mědi. Obě strany desky se musí vodivě propojit, k tomu slouží vzácný kov palladium (případně vodivé polymery apod.). Ve speciálních lázních se pak nanáší tenká měděná vrstva způsobem, kdy se využijí zárodky paladia k vyredukování mědi. Tato vrstva není příliš silná (asi 1 μm) ani mechanicky odolná, proto se musí galvanicky zesílit [1], [9], [11].

2.2.2. Vytvoření obrazce a nanesení fotocitlivé vrstvy

Pro vytvoření obrazce a následné technologické úpravy s tímto spojené se využívají 2 metody. První z nich je pokovení celého panelu (Panel plating) s měděnou vrstvou tloušťky asi 15 μm, pak následuje laminace fotorezistu a vytvoření pozitivního obrazce. Na závěr už stačí jen DPS odleptat a odstranit fotorezist. Ve většině případů je využívána druhá metoda (pattern plating), kde se pokovuje vrstvou mědi tloušťky asi 5 μm celý panel, následně se vytvoří obrazec a měď se opět zesílí vrstvou 15 μm, tentokrát ovšem jen na samotném obrazci, nikoliv po celé ploše. Tím dochází jednak k úspoře mědi, ale také při odleptávání se odleptává tenčí vrstva mědi, což zkracuje čas a snižuje riziko podleptání plošných vodičů. Následně je možné spoje pokovit vrstvou cínu. V dnešní době jsou požadavky natolik přísné, že toto pokovení lze provést také bezolovnatou technologií, která také splňuje směrnice RoHS. V případě cínového rezistu se pro odleptání používá kyselina chromsírová. V náročných aplikacích se používá také galvanické zclacení. Kromě 1-3 μm vrstvy zlata se nanáší také asi 10 μm galvanického niklu. Tato metoda zaručuje vysokou odolnost proti korozi, navíc plošky jsou ideálně rovné, což je potřebné v SMT. Pro nanesení fotocitlivé vrstvy se používá buď kapalný fotocitlivý materiál nebo suchý rezist. V průmyslu je nejčastější metoda nanášením kapalného rezistu na válci. Tento proces lze opakovat, díky tomu lze získat potřebnou tloušťku rezistu. V praxi se používají tloušťky okolo 40-50 μm. Po tomto procesu následuje expozice fotocitlivé vrstvy. K tomu je využito UV záření. Před samotným leptáním je nutné provést kontrolu, která je nezbytně důležitá, protože v této fázi výroby je ještě možné opravit potenciálně vadné kusy, což po samotném odleptání už možné nebude. Výrobce by měl klást na tuto kontrolu velký důraz, protože se dá omezit případná zmetkovitost výroby. Následně se pak odstraní organický rezist s využitím tzv. stripovacích roztoků [1], [3], [9], [11].

2.2.3. Leptání a technologický proces před nanesením nepájivé masky

Hlavní úlohou leptání je odstranit měděnou vrstvu okolo motivů tak, aby neodleptán zůstal pouze motiv. Proces leptání je jeden z klíčových úkonů, který může výrazně ovlivnit kvalitu DPS. Tato technologie vyžaduje velkou náročnost na používané roztoky. Je důležité kontrolovat několik parametrů: teplotu roztoku, pH, koncentraci apod. Mezi hlavní kvalitativní požadavky na tento proces je co nejmenší podleptání spojů. Šířka plošných vodičů je v náročnějších aplikacích velmi malá, proto je nepřijatelné ji nevhodným odleptáním zužovat. Leptání se provádí převážně ponorem, ovšem trend této doby směřuje na odleptávání měděné vrstvy ostřikem. Zatímco odleptávání ponorem je časově zdouhavé, prodlužuje se tím jednak výroba DPS, ale také její kvalita je horší z pohledu její delší doby namáhání leptacím roztokem.

Při tloušťce měděné vrstvy 35 μ m se lze metodou ostřikováním dostat na dobu leptání asi 90s. Po procesu odleptání následuje odstranění kovového rezistu z desky tj. stripování. Zde se kladou nejvyšší požadavky na čistotu, protože před nanesením nepájivé masky je potřeba mít desky ideálně čisté. Celý tento proces od leptání po stripování je poslední dobou nahrazován linkami, což snižuje potřebu lidské práce v rizikovém prostředí. Leptací linka firmy Laif Engiengineering splňuje náročné požadavky jako je rychlost leptání a veličiny, které to ovlivňují, v důsledku toho je linka schopná uzpůsobit dobu leptání v závislosti na teplotě roztoku, obsahu mědi v roztoku (ta je udržována na konstantní hodnotě) a pH. Rovněž splňuje požadavky na cirkulaci oplachových roztoků, které se měří v jednotkách vodivosti. Po překročení zadané vodivosti se roztok vymění. Společnost Printed s.r.o [10] tuto linku využívá a uvádí délku celého technologického procesu okolo 3 minut [1], [8], [10].

2.2.4. Nepájivá maska

Nepájivá maska měla počátkem zavedení do výroby funkci jedinou a to zabránit při pájení na vlně tvorbě můstků. Později se požadavky na masku začaly zpříšňovat, jednak z důvodu menších mezer mezi pájecími ploškami, ale také proto, že měla za úkol chránit desku před vnějšími vlivy. Mezi hlavní požadavky kladené na nepájivou masku patří přilnavost z důvodu zajištění stálých mechanických i elektrických vlastností. Jako materiály se používají epoxidy, neboť ty dokážou zaručit výbornou přilnavost. Maska rovněž překrývá vodiče, to je tzv. zapouzdrnění plošného spoje. Pro zapouzdrnění máme definované krycí a plnicí schopnosti. Tloušťka povlaku masky je definována právě krycími schopnostmi a schopnostmi průniku masky mezi plošné vodiče s malou izolační mezerou. Maska rovněž musí vydržet vysoké teploty (při pájení) a musí být velmi přesná, to pak ovlivní pájitelnost součástek a vznik můstků. Poslední dobou jsou kladeny požadavky na rovnoměrnost masky, tomu odpovídají i moderní zařízení, se kterými lze toho dosáhnout [1].

2.2.5. Povrchová úprava

Metodou HAL (Hot Air Leveling) se nanáší pájka na plošky, které nejsou zakryté nepájivou maskou. Motiv desky je tímto chráněn před korozí. Před nanesením je nutné povrch dokonale očistit. Tloušťka této vrstvy se pohybuje okolo 6 μ m a je složená z cínu a olova. Min. obsah cínu je 55%, aby zajistil dobrou pájitelnost. Podstatou činnosti je ponoření DPS do roztavené slitiny, která se v zápětí vytáhne a pomocí horkého vzduchu a nože se přebytečná slitina oddělí. Tato metoda má tu nevýhodu, že vlivem zemské přitažlivosti může dojít k jisté nerovnoměrnosti pokovených spojů, proto se začala používat technologie vodorovného nanášení slitiny na DPS. Mezi další metody povrchové úpravy patří SSD (Solid solder deposit), ta funguje na principu nanášení pájecí pasty a následném přetavení, ovšem zdaleka není tak používaná jako HAL [1], [9], [11].

2.3. Aditivní metoda výroby DPS

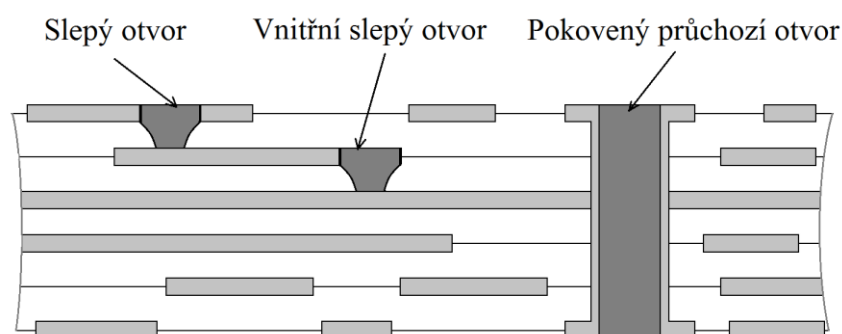
Tento výrobní proces je v jistém slova smyslu opakem procesu subtraktivní metody. Hlavní princip spočívá v nanášení měděných vodivých cest včetně pokovení otvorů. Jelikož při této metodě nedochází k leptání, tak problémy vzniklé právě při leptání můžeme vyloučit, což je velká výhoda této metody. Důsledkem odlišného technologického procesu je také vyloučeno prohnutí případně zkroucení desek, neboť výchozí materiál není tepelně zpracováván. Aditivní metoda výroby také přináší tu výhodu, že dochází k významné úspoře mědi a tloušťka vodičů je

zvolená optimálně. Mezi nevýhody aditivní metody výroby patří min. šířka plošného vodiče 0,1mm a vysoké finanční náklady na vývoj a její výzkum. Z těchto důvodů není tato technologie rozšířená při sériové výrobě [1], [3], [4].

2.4. Vysoká hustota propojení u vícevrstvých DPS

Postupným vývojem techniky se klade velký důraz na miniaturizaci výrobků. K tomu jsou zapotřebí jednak vícevrstvé DPS, ale také technologie mikropropojení – microvia, která s tímto podstatně souvisí. Tato technologie má zaručit správné vodivé propojení mezi vrstvami. K tomu se využívají otvory průměru 150 μ m a méně. Ty mohou být tzv. slepé, skryté (vnitřní slepé) nebo skrz celou desku *obr. 2.1*. Způsob realizace mikropropojení můžeme rozdělit do několika metod:

- mechanicky vrtané
- laserem vrtané
- plazmou leptané
- chemicky leptané
- broušené mechanicky
- fotolitograficky definované
- ražené.



Obr. 2.1 – Propojení jednotlivých vrstev plošných spojů – struktura HDI [1]

Pro výrobu těchto otvorů se nejčastěji používají lasery CO₂ nebo YAG. Výkonnost těchto laserů je až 300 000 otvorů za minutu. Při leptání je z otvorů odstraněna měď, pomocí plazmy se následně odstraní dielektrikum, proto vzniknou díry, které se následně pokoví a zaručí tak vodivé propojení vrstev [1], [3].

3. Materiály pro výrobu DPS a jejich vlastnosti

Volba správného základního materiálu představuje velmi významnou součást návrhu DPS. Výběr základního materiálu by měl v sobě zahrnovat požadavky plynoucí z náročnosti aplikace, technologii výroby, konstrukční parametry a ekonomiku výroby. Vlastnosti materiálů pro výrobu DPS se dělí na elektrické, tepelné a mechanické. Každý základní materiál má své specifické vlastnosti, podle kterých by se mělo odvíjet praktické využití. Mezi nejpoužívanější materiál dnešní doby je FR-4, který splňuje několik důležitých konstrukčních parametrů a zároveň jeho cena není příliš vysoká. V náročnějších aplikacích je ale potřeba volit lepší materiály z hlediska jejich konstrukčních parametrů.

3.1. Konstrukční parametry a vlastnosti materiálů DPS

Spolehlivost a správná funkce daného zařízení je také závislá na materiálu DPS, je proto důležité vědět, jakým klimatickým podmínkám bude zařízení vystavováno, zda bude deska nějakým způsobem mechanicky namáhána včetně vibrací, apod. V tab. 3.1 jsou označeny vlastnosti DPS v závislosti na konstrukčních parametrech DPS.

Tabulka. 3.1 – Vlastnosti DPS v závislosti na konstrukčních parametrech [1].

Sledované konstrukční parametry DPS s el. obvodem	Vlastnosti Desky plošných spojů								
	Teplota skleněné přeměny T _g	TCE	Tepelná vodivost	Modul roztažnosti	Modul pružnosti	Dielek. konstanta	Odpor na objem	Povrchový odpor	Pohltivost vlhkosti
Teplotní a výkonové cykly	X	X	X	X					
Vibrace				X	X				
Mechanický náraz				X	X				
Teplota a vlhkost	X	X				X	X	X	X
Ztrátový výkon el. obvodu	X		X						
Velikost SMD pouzder		X		X					
Hustota el. obvodu						X	X	X	
Přenosová rychlost el. obvodu						X	X	X	

Základní vlastnosti materiálů pro DPS můžeme rozdělit na 3 základní oblasti:

- elektrické
- mechanické
- tepelné

3.1.1. Elektrické vlastnosti DPS

Mezi základní elektrické vlastnosti patří:

- Relativní permitivita – je závislá na frekvenci, složení základního materiálu, teplotě, vlhkosti a ovlivňuje kapacitní vazby v obvodu.
- Ztrátový činitel – udává míru dielektrických ztrát, je závislý především na frekvenci a teplotě, ovlivňuje ztráty vedením.
- Měrný povrchový odpor ρ_p – tento odpor charakterizuje odpor mezi dvěma vodivými plochami, je udáván v jednotkách Ω a dosahuje hodnot až $10^{15} \Omega$. Měření se provádí na kruhovém vzorku DPS. Pro tento odpor platí vztah:

$$\rho_p = R_p \frac{o}{l} [\Omega] \quad [4]$$

Popis veličin:

R_p – naměřený odpor mezi vodivými cestami [Ω]

o – obvod vnitřního mezikruží [m]

l – šířka mezery [m]

- Měrný vnitřní odpor ρ_v – tento odpor se měří kruhovými elektrodami, z nichž jedna elektroda je umístěná na horní straně DPS a druhá elektroda na spodní straně DPS. Odpor mezi nimi se dosadí do následujícího vztahu:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h} [\Omega\text{m}] \quad [4]$$

Popis veličin:

R_v – naměřený odpor [Ω]

S – plocha vnitřní elektrody [m^2]

h – tloušťka materiálu [m]

- Průrazné napětí – je elektrická odolnost materiálu vůči el. výboji.

[1], [3], [4].

3.1.2. Elektrické vlastnosti kresby DPS

Proudová zatížitelnost je jedna z nejdůležitějších vlastností při návrhu DPS, závisí na tloušťce měděné fólie, na základním materiálu a na šířce vodivých cest. Tloušťka měděné fólie se pohybuje v rozmezí 35 až 71 μm (ale i méně pro jisté případy). Jelikož ochlazovací plocha plošného spoje je větší než u drátového spoje, proto plošné spoje mají vyšší proudovou zatížitelnost. Tab. 3.2 znázorňuje dovolený trvalý proud spojem a mezní proud, u kterého se spoj přetaví v závislosti na šířce spoje o tloušťce 35 μm [1], [4].

Tabulka. 3.2 – Proudová zatížitelnost plošného spoje [1]

Šířka plošného spoje [mm]	Mezní proud [A]	Dovolený proud [A]
1,0	5	0,8
1,5	10	1,2
2,0	12	1,6
3,0	15	2,4
6,0	23	4,8

Tepelná zatížitelnost celkem významně souvisí s proudovou zatížitelností, neboť průchod proudu plošnými vodiči způsobuje zvýšení jejich teploty. Po překročení dané teploty nastává trvalá destrukce vodivých cest. Tato zatížitelnost také závisí na celkovém rozmístění kovů na DPS, na případném mechanickém namáhání, na velikosti plochy, po které se teplo šíří, na rozdílu teplot mezi deskou a okolím, na charakteru proudění okolního vzduchu apod. Mimo samotné proudové resp. tepelné zatížení DPS se také uvádějí: nárazový proud (ve zkratovém režimu), izolační odpor kresby plošného spoje, povolené napětí mezi plošnými vodiči, parazitní indukčnost a parazitní kapacita [1], [4], [6].

Napěťová zatížitelnost zahrnuje průrazné napětí a max. provozní napětí. Tato napětí se udávají v závislosti na mezeře mezi vodiči a udávají je normy: IEC 512-2 a ČSN EN 609 50. Napěťová zatížitelnost je brána jako přípustné napětí mezi dvěma vodiči, u DPS to závisí na druhu základního materiálu, nepájivé masce (ochranný povlak na DPS), vlastnostech prostředí. Ochranný povlak neboli nepájivá maska má za úkol zachovat vlastnosti desky při působení prachu, vlhkosti atd. V souvislosti s napěťovou zatížitelností je důležité věnovat pozornost také izolaci, kterou můžeme rozdělit:

- Základní izolace – při porušení této izolace může vzniknout úraz elektrickým proudem a slouží také jako nenahraditelná součást DPS, což vychází z její podstaty.
- Přídavná izolace – tato izolace se přidává k základní izolaci a její funkce je obdobná, uplatňuje se při poruše základní izolace.
- Zesílená izolace – tato izolace se využívá v aplikacích, kde může dojít ke styku člověka s potenciometrem, přepínačem, tlačítkem, konektorem apod. [6].

3.1.3. Mechanické vlastnosti

- Pevnost v ohybu – při ohnutí DPS může dojít k jejímu poškození, dá se tomu zabránit jednak při samotné výrobě nebo kovovou konstrukcí, která se k desce namontuje a tím zaručí její mechanickou pevnost v ohybu. V průběhu následných manipulací dává deskám pevnost v ohybu dostatečnou pevnost.
- Rovinnost, prohnutí, zkroucení – tyto vlastnosti jsou důležité především při osazování SMD součástek, protože tam jsou kladeny nejvyšší požadavky na dokonale rovnou desku z důvodů následujících technologických postupů.
- Stabilita rozměrů – při výrobě a osazování DPS jsou desky vystavovány vysokým teplotám. Např. při pájení vlnou je důležité, aby tepelná roztažnost byla minimální. Zjišťuje se tepelná roztažnost v obou směrech, ale i v tloušťce materiálu, dále pak smrštění měděné fólie při oteplení a ochlazení.

- Nasákavost vodou – při ponoření desky do vody se měří hmotnost vody, kterou deska absorbuje. V důsledku toho lze pak vhodně zvolit materiály pro tyto desky v závislosti na prostředí, ve kterém bude deska používána.
- Pevnost měděné fólie při loupání – tato pevnost je udávána v jednotkách $N \cdot mm^{-1}$, což je síla potřebná k odloupení vodiče na jednotku šířky vodiče. Může být definována při pokojové teplotě nebo při teplotním namáhání po pájecím procesu. Je také závislá na základním materiálu [1], [4].

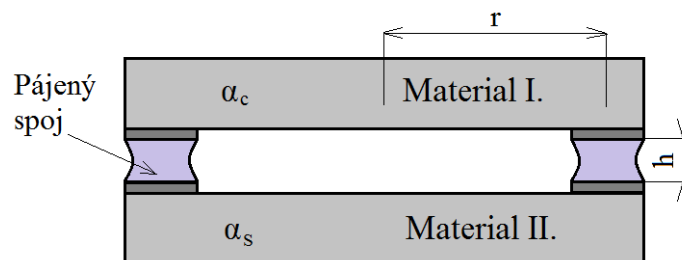
3.1.4. Tepelné vlastnosti

- Teplota skelného přechodu t_g – je teplota, při které DPS přechází ze stavu tvrdého do stavu viskózního, protože dochází k výrazným změnám činitele tepelné roztažnosti TCE.
- Tepelná odolnost při pájení – DPS musí odolat delaminaci při pájení vlnou, přetavením, ale také při ručním pájení. Tenké vrstvy měděné fólie nejsou vhodné používat tam, kde pájení bude prováděno ručně, protože materiál je lokálně zahříván velmi vysokou teplotou.
- Trvalá tepelná odolnost – sleduje se při 100 - 500 hodinách provozu této desky.
- Hořlavost – je schopnost nepodporovat zapálení v důsledku náhodného přehřátí některé z elektronických součástek.
- Činitel tepelné roztažnosti TCE a jeho působení je asi nejdůležitější tepelná vlastnost.

3.1.4.1. Činitel tepelné roztažnosti TCE

TCE je definovaný jako relativní změna rozměru při teplotní změně $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jelikož keramické materiály mají TCE asi $5\text{--}7\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ a standardní DPS (epoxid-sklo) od 15 až 20 $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$, v důsledku toho jsou pájené spoje, obzvláště pak u součástek SMD, značně namáhány. Ideální případ je, když tepelná roztažnost desky je stejná jako tepelná roztažnost pouzder SMD součástek. Pokud se ovšem TCE liší, pak se deska rozpíná více než pouzdro součástky a pájené spoje jsou namáhány. Pro zamezení těchto problémů je dobré používat součástky, které mají vývodová pouzdra. Součástky s vývodovými pouzdry jsou do jisté míry pružné, takže rozdílný TCE nehraje velkou roli. U technologie povrchové montáže (SMT) může mít rozdílný TCE katastrofální následky, proto existuje několik kritérií, jak těmto problémům zabránit popř. jak je omezit:

- Používat součástky, které mají co největší výšku pájeného spoje (některá pouzdra SMD součástek mají kulaté a tedy i vysoké vývody).
- V průběhu technologických procesů používat co nejnižší přípustné teploty.
- Používat materiály se stejným TCE jako mají součástky (je-li to možné z technicko-ekonomických požadavků).
- Výroba DPS s tzv. vyrovnávacím materiálem (např. Kevlar), který je součástí základního materiálu (zřídka používané).
- Co nejméně používat velké keramické součástky.
- Měděné plochy výrazně snižují roztažnost desky, proto se při samotném návrhu desky měď tzv. rozlévá s potenciálem např. GND.
- Pokud to není nutné, tak nepoužívat extrémně malé otvory pro propojování vrstev DPS.
- Používat olovnaté pájky, nicméně dle požadavků zákazníka a aplikace tohle může být problém [1], [4].



Obr. 3.1 – Nepružné spojení součástky s DPS [4]

Na obrázku 3.1 je znázorněno nepružné spojení součástky k desce. Pro výpočty relativního prodloužení lze využít následující vztahy.

Pro relativní změnu $\Delta\varepsilon$ platí:

$$\Delta\varepsilon = F \frac{r|\alpha_c \cdot \Delta T_1 - \alpha_s \cdot \Delta T_2|}{h} \quad [4]$$

V lineární oblasti lze vyjádřit namáhání jako pnutí podle Hookova zákona:

$$\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon \quad [4]$$

Popis fyzikálních veličin pro uvedené vztahy:

$\Delta\varepsilon$ – relativní změna rozměrů [-]

h – výška pájeného spoje [m]

r – vzdálenost spoje od středu [m]

ΔT – změna teploty [K]

α – koeficient délkové roztažnosti [ppm · °C⁻¹]

F – konstanta závislá na rozměrech (nabývá hodnot 1 až 1,5) [-]

E – Youngův modul pružnosti v tahu [Pa]

$\Delta\sigma$ – napětí v tahu [Pa]

3.2. Materiály pro výrobu DPS

Nedílnou součástí výroby DPS je správná volba materiálu pro jeho výrobu. Materiály se dělí na několik kategorií podle jejich vlastností. Optimální výběr materiálu je závislý na náročnosti aplikace a na použitých technologiích všech operací. Je nutné uvažovat i technicko-ekonomické požadavky a v některých případech volit kompromis mezi cenou materiálu a jeho vlastnostmi.

Základní dělení DPS

- Podle základního materiálu (organický a neorganický)
- Podle ohebnosti (neohebné a ohebné). Neohebné DPS se dělí z hlediska konstrukce (podle počtu vrstev, s nosnou deskou a s omezovacím jádrem)

3.2.1. Materiály na organické bázi

Pro neohebné desky se jako pojivo používá organická pryskyřice, pro ohebné DPS termoplasty. Mechanické vlastnosti desky jsou závislé především na tzv. výztuži. Patříčná výztuž s pojivem označuje materiál, který je značen podle normy NEMA (National Electrical Manufacturers Association).

Jako výztuž se používá:

- Skleněné vlákno – vyrábí se z elektrotechnického skla. Jako materiál se používá Hlinitoboritikřemičité sklo Al-Si-B.
- Tvrzený papír – klíčové parametry pro tvrzený papír jsou: pórovitost, hustota, nasákavost, povrch, tloušťka vrstvy a její rovnoměrnost. Vyráběné tloušťky jsou 5-150 μ m s laminací pryskyřice.
- Křemenné vlákno
- Uhlíkové vlákno
- Aramidové vlákno

Výztuž v kombinaci s vhodným pojivem (materiál pro výrobu DPS) udává označení NEMA. Výčet těch nejpoužívanějších materiálů v elektrotechnice a jejich vlastnosti jsou zobrazeny v tab. 3.3.

Tabulka. 3.3 – Vlastnosti materiálů pro DPS

Materiál	XXXPC	FR-2	FR-3	FR-4	FR-5	FR-6	G-11	GPO	CEM-1	CEM-3
Pojivo	Fenol	Fenol	Epoxy	Epoxy	Epoxy	PES	Epoxy	PES	Epoxy	Epoxy
Odolnost proti pájení (s)	5	5	5	20	20	20	20	20	20	20
Povrchový odpor, min. (Ω)	10^9	10^9	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}
Vnitřní odpor, min. (Ω)	10^8	10^8	10^9	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}
Permitivita (1 MHz)	4,8	4,8	4,8	5,4	5,4	4,3	5,4	4,3	4,9	5,0
Ztrátový činitel (1MHz)	0,04	0,04	0,04	0,035	0,035	0,03	0,035	0,03	0,038	0,036

3.2.1.1. Flame resist

Mezi nejpoužívanější materiály v elektrotechnice patří materiály s označením FR dle NEMA. Už delší dobu je materiál FR-4 nejpoužívanější. Je relativně levný v kombinaci s dostačujícími vlastnostmi pro elektroniku. Jelikož se tento materiál používá velmi často, proto je důležité pamatovat na jeho vlastnosti, kterými jej lze definovat:

- dobré mechanické vlastnosti
- vysoká mechanická pevnost vzhledem k jeho hmotnosti
- snadná dostupnost a výroba ve velkých sériích
- dobré dielektrické vlastnosti vlivem využití pryskyřice
- pro aplikace vysokofrekvenční techniky může být tloušťka dielektrika kritická
- vysoká odolnost pryskyřice proti vnějším vlivům

Při aplikaci materiálů FR-4 je s tímto spojená řada nevýhod, které je potřeba kompenzovat:

- Při vrtání dochází k mírnému tavení epoxidu, který zanáší otvory a přichytává se i k měděným částem, proto je potřeba speciálními metodami otvory pročistit, neboť by pokovení otvorů mohlo činit problémy jak s funkčností, tak i se spolehlivostí zařízení.
- TCE je poměrně rozdílný v porovnání se součástkami, proto je potřeba využít kritéria, aby nedocházelo k namáhání pájených spojů zejm. v technologii SMT (viz. kapitola 3.1.4.1).
- Materiál není teplotně stálý, což vede k používání polohových značek pro automatizaci.
- Procesem pájení deska prochází vysokými teplotami a v důsledku toho dochází k měknutí pryskyřice, což v limitních případech může desku zničit. Materiál FR-5 je z tohoto pohledu odolnější, ale je také dražší [11].

3.2.2. Materiály na neorganické bázi

Tyto materiály se označují také jako anorganické, jejich přednosti oproti organickým substrátům jsou: velmi dobrá tepelná odolnost, malá hodnota TCE, malá navlhavost, vysoká chemická odolnost. Použití těchto materiálů není zdaleka tak rozšířeno jako je tomu v případě organických substrátů. Je to z důvodu vyšší hmotnosti, vyšší ceně, křehkosti a rozměrového omezení. Samostatně se tyto materiály používají pro rozměrově malé desky, pro užší spektrum aplikací. Také se používají v kombinaci s organickými substráty, ale tam se musí řešit problematika mechanického pnutí. Realizace této technologie je dost drahá, což je pravděpodobně jeden z hlavních důvodů toho, že se v praxi moc nepoužívá. Materiály, které se byt' jen zřídka používají, jsou:

- Korundový substrát – pro dosažení správných fyzikálních vlastností je zde využitý oxid hlinitý s malým množstvím kovových oxidů. Mezi hlavní přednosti tohoto materiálu je eliminace rozdílného TCE mezi deskou a součástkami SMD, proto pro technologii SMT je vhodný, neboť jeden ze základních a důležitých požadavků pro materiál (viz. kapitola 3.1.4.1) je splněný.
- Beryliový substrát – je na tom z fyzikálního hlediska obdobně jako korundový, liší se zejm. tepelnou vodivostí, která je u beryliového substrátu několikrát vyšší. Tento substrát se moc nepoužívá z důvodů velmi vysoké ceny a toxicity.
- AlN – zkratka aluminium – nitrid patří mezi novější materiály. Mezi jeho zásadní přednosti patří vysoká tepelná vodivost, která je blízká k tepelné vodivosti kovů. Pro srovnání s korundovým substrátem je tato vodivost asi 6× větší.

4. Technologie povrchové montáže SMT

SMT (Surface mount technology - technologie povrchové montáže) má v současné elektronice velmi vysoký význam. Díky této technologii je možné v současné době dostat se tak daleko, že rozměry desek a hlavně finálních výrobků jsou dostatečně minimalizovány, výrobní proces je značně urychlen, a proto také náklady výrazně klesají. Charakteristické pro tuto technologii je tedy osazování součástek na povrch DPS, vzhledem k podstatně menším rozměrům součástek je pak možné dostat se na velmi malé rozměry.

4.1. Charakteristika SMT technologie

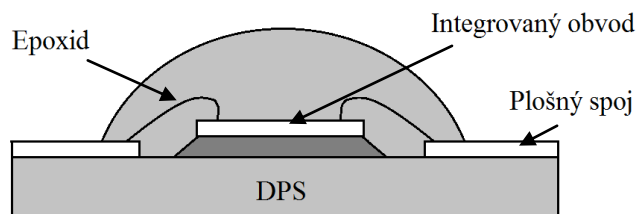
Minimalizace rozměrů je podstatná výhoda SMT technologie, ale není jediná. SMT technologie má řadu dalších výhod, díky kterým je výroba efektivnější a ekonomičtější:

- Automatizace výrobního procesu osazování do takové míry, že doby osazování oproti součástkám s vývody jsou výrazně kratší, navíc stroje osazující vývodové součástky musí splňovat náročné požadavky na různé typy součástek.
- Není potřeba vrtat otvory pro součástky, takže odpadá další z technologických úkonů a doba výrobního procesu je opět kratší.
- Přenos signálu je na kratší dráze, což je podstatné zejména ve vysokofrekvenční technice.
- Absence dlouhých vývodů má rovněž pozitivní vliv pro DPS, neboť jednak je zmenšen odpor vodičů, ale také je zmenšená jejich vzájemná kapacita. V důsledku toho pak časová konstanta je menší, proto dojde ke zlepšení dynamických vlastností.
- Možnost osazování po obou stranách DPS.
- Obecně vyšší spolehlivost.

Naopak mezi nevýhody SMT patří:

- Zhoršené vlastnosti odvodu tepla, neboť na menší ploše je více aktivních prvků, v důsledku toho je pak integrace do jisté míry limitována.
- V případě ruční montáže je efektivita výrobního procesu značně omezena.
- Činitel tepelné roztažnosti TCE je rozdílný jak u součástek, tak i u desky (viz kapitola 3.1.4).

S technologií povrchové montáže také souvisí aplikace COB (Chip on board). Podstata této metody spočívá osazením holého substrátu integrovaného obvodu přímo na desku (*obr. 4.1*). Kontaktování je prováděno ultrazvukem případně termokompresí. Obvod je tedy nezapouzdřený a musí se zakrýt krycí hmotou, což bývá většinou epoxid.



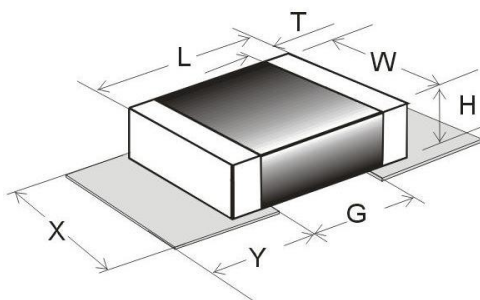
Obr. 4.1 – Technologie COB [1].

4.2. Technologické požadavky kladené pro návrh DPS pro SMT z výrobního a ekonomického pohledu

Abychom maximálně využili potenciál technologie SMT, je nutné řídit se požadavky jak na správnou funkci, spolehlivost, vyrobiteľnost, ale také na ekonomiku výroby. Pro tyto účely existují návrhová pravidla, která tyto požadavky z velké části zaručí. Z těchto pohledů platí veškeré technicko-ekonomické požadavky z kapitoly 1, nicméně pro technologii povrchové montáže je nutné brát v úvahu více náležitostí, které jsou spojeny zejména se zcela odlišným technologickým postupem osazování, případně pájením.

4.2.1. Pájecí plošky

Jedna z nejdůležitějších zaměření pro návrh DPS pro technologii SMT jsou pájecí plošky. Je nutné používat jak správné rozměry, tak i orientace a přizpůsobení tak, aby montáž pro automatické osazovací linky byla co možná nejefektivnější. V některých případech je nutné zhotovit speciální plošky pro testování. Velká hustota pájecích plošek klade požadavek na přesnou a kvalitní nepájivou masku. Před samotným návrhem pájecích plošek je potřeba znát technologii pájení, protože velikosti plošek se pro každou technologii liší, je nepřipustné navrhnout kompromis mezi oběma rozměry. Další problém je tolerance součástek, která bývá až $\pm 10\%$, což je v limitních případech až 20% rozdíl. Tzv. efekt Tombstoning je hrozbou pro špatný návrh plošky, vzniká v důsledku nerovnováhy sil a součástka se nadvzdvedne.



Obr. 4.2 – Rozměry kvádřové SMD součástky [11]

Pro návrh plošek jsou klíčové rozměry: X – šířka pájecí plošky (mm); Y – délka pájecí plošky (mm); G – mezera mezi ploškami (mm). V uvedených vzorcích je obsažena konstanta K, která určuje technologii pájení. Pro pájení vlnou je $K = 0,5\text{mm}$; pro pájení přetavením je $K = 0,25\text{mm}$. Výpočty všech plošek lze spočítat pomocí následujících vztahů, ovšem po výpočtu je nutné výsledek zaokrouhlit na nejbližší definovaný rozměr.

$$X = W_{max} - K \quad (\text{pro pájení vlnou})$$

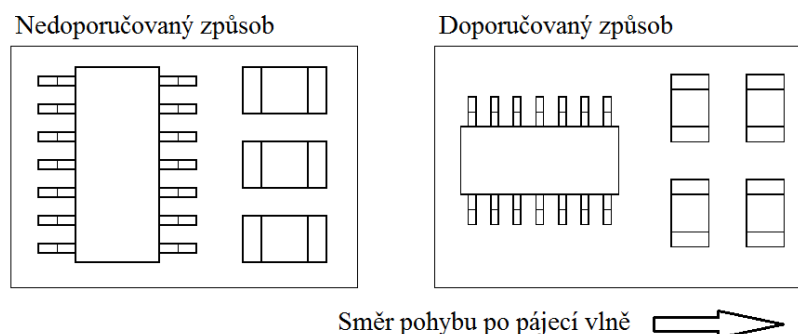
$$X = W_{max} + K \quad (\text{pro pájení přetavením})$$

$$Y = \frac{H_{max}}{2} + T_{max} + K$$

$$G = L_{max} - 2T_{max} - K$$

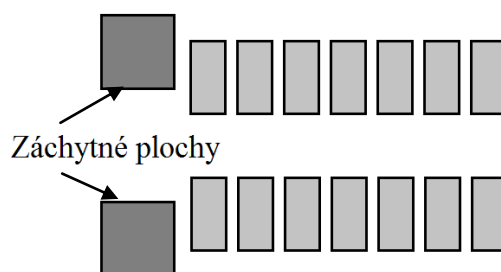
Důvodem, proč je potřeba pro technologii pájení vlnou používat větší plošky (na rozdíl u technologie přetavením), je riziko tzv. Stínového efektu, kdy dochází k nedokonalému zapájení vývodů, protože součástka vlně „stíní“, tím pádem se pájka dostatečně nerozlije po plošce [1], [2].

Problematika pájecích plošek nespočívá pouze v jejich velikostech, ale také v jejich vzájemném rozmístění, vzájemných vzdálenostech, na správných tvarech a v umístění testovacích bodů. Správný směr pájení pro pájení vlnou je naznačený na obrázku 4.3.



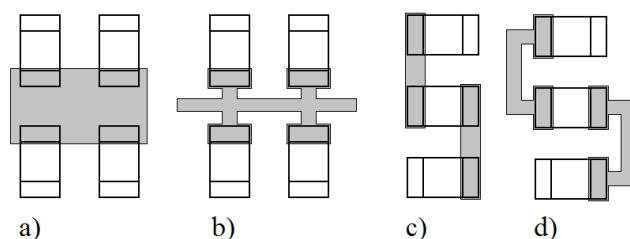
Obr. 4.3 – Vhodný směr pro pájení vlnou [4]

Experimentálním zjištěním bylo dokázáno, že zkratky na Integrovaných obvodech vznikají vždy na posledních dvou vývodech (při pájení vlnou). Vychází to z principu pájení vlnou, kdy pájka postupně smáčí jednotlivé vývody a na posledních dvou vývodech udělá kapku, ze které vznikne zkrat. Následně jsou nutné ruční opravy, v důsledku kterých se výrobní proces prodlouží. Pro zabránění zkratů na posledních dvou vývodech je dobré umístit na konec IO tzv. záchytné plochy, jak je naznačeno na obr. 4.4.



Obr. 4.4 – Rozmístění záchytných ploch [4]

Tvar a velikost záchytných ploch je dobré navrhnout na první pohled odlišný od plošek pro součástku, abychom snížili riziko chybného osazení. Pro větší obvody s pouzdem QFP je vhodné natočení o 45° a rovněž doplnit o záchytné plochy v rozích. Co se týká kresby obrazce, vodivé spoje by měly být tenčí než samotné plošky, neboť při použití pájení vlnou se na vodivých cestách zbytečně nanese velká vrstva pájky, což v budoucnu může činit problémy s kvalitou spoje. U technologie přetavením může dojít k tomu, že se součástka posune mimo pájecí plošky. Vhodné a nevhodné vedení vodivých cest je naznačené na obr. 4.5.



Obr. 4.5 – a,c – nevhodné vedení spojů; b,d – doporučené vedení spojů [2]

4.2.2. Vzájemné vzdálenosti součástek

Problematika samotných plošek v technologii SMT není jediná, důležité je rovněž ohlížet se na vzájemné vzdálenosti mezi součástkami. Důvody, proč se tímto problémem zabývat, jsou: vyrobiteľnosť, testovateľnosť a opraviteľnosť. Preto je nutné zaměřit se na minimální vzájemné vzdálenosti. Shora tento interval z těchto pohledů není omezený, nicméně jak je uvedeno v kapitole 1, tak také není dobré mít vzdálenosti zbytečně velké, obzvláště ve vysokofrekvenční a výkonové elektrotechnice. Pro vzájemné vzdálenosti platí obecně:

- Vzájemný odstup pájecích plošek dvou různých součástek je 1,25 mm, u PLCC 1,9 mm.
- U součástek, které mají dva vývody (rezistory, kondenzátory apod.), je min. vzdálenost mezi nimi 1,25 mm a 1 mm ze stran, kde nejsou kontakty.
- Minimální vzdálenost součástek od okrajů DPS se doporučuje 5mm.

Této problematice se detailně věnovala firma Siemens a vypracovala přesné tabulky pro správný návrh součástek v závislosti na typu a velikosti pouzdra, jak udává literatura [1].

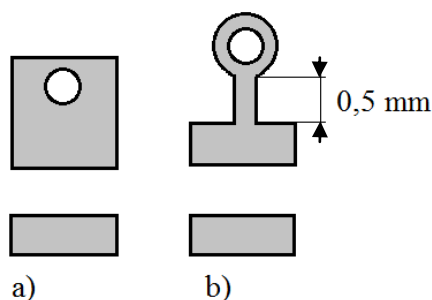
4.2.3. Izolační mezery mezi plošnými spoji a průchozí otvory

Dle technologických možností má každý výrobce DPS několik druhů obrazců, které se liší šířkami jak mezer mezi vodiči, tak i samotnými šířkami plošných vodičů. Čím jsou tyto vzdálenosti menší, tím je DPS dražší, ale v nenáročných aplikacích se dá vystačit i se standardními šířkami. V tab. 4.1 je znázorněno, jak se tyto vzdálenosti liší v závislosti na kategorii rozteče.

Tab. 4.1 – Minimální vzdálenosti pro různé kategorie rozteče [1]

	Standard	Jemná rozteč	Ultra jemná rozteč
Ploška	0,6 x 2,0 mm	0,6 x 2,0 mm	0,5 x 2,0 mm
Plošný vodič	200 μm	180 μm	90 μm
Otvor	600 μm	300 μm	150 μm
Mezera	200 μm	180 μm	90 μm

Otvory pro propojení jednotlivých vrstev by měly být mimo pájecí plošku, obzvláště při technologii pájení přetavením, neboť je tam zvýšené riziko k tzv. migraci pájky, což je odlití pájky z plošky do otvoru a nedokonalé zapájení součástky. Tento problém lze také odstranit nanesením nepájecí masky na tyto otvory. Pro pájení vlnou není vhodné dávat tyto otvory pod součástky, protože tavidlo by mohlo pod ně nevzlínat. Vhodné a nevhodné připojení otvorů k pájecím ploškám naznačuje obr. 4.6 [1].



Obr. 4.6 – a) špatná, b) správná realizace průchozího otvoru [1]

4.3. Moderní technologický postup osazování SMD součástek

Osazování SMD součástek je jedna ze základních technologických montáží SMT technologie. Před samotným osazováním je nutné nanést na DPS pájecí pastu nebo lepidlo. Pájecí pastu nebo lepidlo lze nanést ručně, ale v dnešní době to drtivá většina firem nanáší automatickými zařízeními. Souvisí to s náročností zařízení (počet součástek na DPS) a s počtem vyráběných kusů. Poté následuje samotné osazování, které lze rovněž provádět automaticky nebo ručně. Pokud mají součástky netypické tvary nebo pokud vznikají problémy při automatickém osazování, tak se automatické osazování kombinuje s ručním.

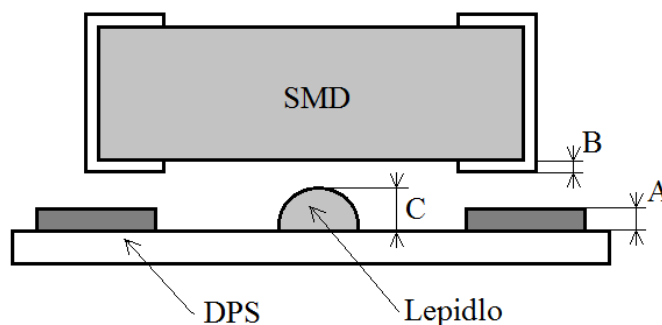
4.3.1. Nanášení pájecí pasty na DPS

Osazování do pájecí pasty se provádí v případech, kdy následný proces pájení bude prováděn přetavením. Při pájení vlnou se tento způsob osazování nepoužívá, neboť je neslučitelný s fyzikálními podstatami těchto technologií. Nanášení pájecí pasty se provádí metodou síťotisku, disperzerem nebo tiskem přes šablonu.

- Nanášení pájecí pasty disperzerem – výhoda této metody je nanášení pájecí pasty pouze do těch bodů, kde je to potřeba. Při malých sériích DPS s nízkým počtem součástek se využívá ruční nanášení pájecí pasty. Pokud počet součástek a jejich vývodů je velký, lze použít strojové dávkování (pouze při malých sériích DPS). Způsob nanášení pájecí pasty je velmi přesný a spotřeba pájecí pasty je velmi malá, ovšem na úkor doby osazování.
- Metoda síťotisku – síťo tvoří síťka vláken a fotocitlivý materiál. Místa, na která se bude nanášet pájecí pasta, jsou osvětlená UV světlem. Následný chemický proces odstraní ozářený materiál, takže v místech nanášení pájecí pasty zůstanou pouze vlákna. Síťo se pak umístí asi 1mm nad DPS a otvory pro nanášení pájecí pasty musí být v souladu s pájecími ploškami na DPS. Následným posuvem stěrky, která stírá pájecí pastu po síťu, se vyplňují otvory pouze v místech pájecích plošek.
- Tisk přes šablonu – je obdobný způsob jako metoda síťotisku. Šablona (planžet) pro tento tisk je vyrobena z kovu, takže její životnost je podstatně delší. Dalším rozdílem je umístění šablony přímo na DPS (bez mezery 1mm jako v případě síťotisku). Stěrka vyrobená z pryže má stejnou úlohu jako při technologii síťotisku. Při využití této metody jsou kladeny přísné požadavky na kvalitu a přesnost nepájivé masky. Pokud by nepájivá maska nebyla dostatečně kvalitní (např. dokonale by na DPS „neseděla“), tak by se pájecí pasta dostala pod ní, což by mělo katastrofální následky [2].

4.3.2. Nanášení lepidla na DPS

Nanášení lepidla na DPS se provádí v případech, kdy pro pájení budeme využívat pájení vlnou. Pájení vlnou se používá také při smíšené montáži (kombinace součástek s drátovými vývody se součástkami SMD). Lepidlo se nanáší stejnými metodami jako pájecí pasta, akorát síta (popř. planžety) pro tuto technologii jsou odlišná než u způsobu pro nanášení pájecí pasty. Při osazování do lepidla se lepidlo nenanáší na pájecí plošky, ale do středu součástky popř. do několika bodů mimo pájecí plošky. Pro menší série motivů DPS se používá metoda dávkování disperzerem. Způsob dávkování má také tu výhodu, že velikost kapky lze přizpůsobit pro všechny pouzdra SMD součástek. Výška kapky lepidla by měla být o velikosti součtu obou metalizací (spoje a součástky). Na *obr. 4.7* je naznačená výška lepidla C , která je dána vztahem $C = A + B$. Aby nemusela být výška lepidla tak vysoká, tak pod součástku se navrhuje tzv. slepá ploška, která má stejnou výšku jako měděná fólie A . Pokud je pod SMD součástkami slepá ploška, pak výška lepidla $C = B$. Zařízení, které lepidlo dávákuje, by mělo zahrnovat regulátor teploty, neboť zpracovatelnost lepidel pro SMD součástky se mění v závislosti na teplotě. Výška lepidla by neměla být zbytečně vysoká, neboť by se lepidlo mohlo dostat na pájecí plošky a to je nepřijatelné [2].



Obr. 4.7 – Výška kapky lepidla u SMD součástek [2]

4.3.2.1. Lepidla pro SMD součástky

Lepidla, která se v praxi používají, jsou ve většině případů nevodivá. Vodivá lepidla jsou využívána velmi zřídka a pouze tam, kde je potřeba zajistit vodivá spojení v oblasti stínění apod. Lepidla jsou vytvrditelná buď UV zářením nebo teplem. Vlastnosti a požadovaná kritéria lepidel jsou:

- Lepidla je potřeba plnit do zásobníků tak, aby v něm nevznikaly bubliny, protože nanášení na DPS je prováděno automatickým dávkovacím systémem.
- Lepidla by měly jít dobře vidět na DPS.
- Navlhavost – při navlhnutí mění lepidlo svůj povrchový odpor, který by negativně mohl ovlivnit elektrické vlastnosti DPS, proto lepidlo nesmí navlhat.
- Opravitelnost – po ruční výměně některé součástky nesmí lepidlo DPS poškodit.
- Odolnost proti vysokým teplotám při pájení.
- Ekologická netečnost – lepidlo musí být nehořlavé a jeho chemické složení nesmí mít negativní vliv na lidský organismus.
- Skladování v chladničce o teplotách 5-8 °C, max. po dobu 6 měsíců.
- Dobrá zpracovatelnost lepidla v průběhu 8 hodin po nanesení na DPS [2].

4.3.3. Automatické osazování SMD součástek

Automatické osazování SMD se dělí podle použité technologie osazování. Rychlost osazování se u jednotlivých zařízení liší, ovšem pořizovací náklady těchto strojů jsou nemalé.

Technologické rozdělení způsobů osazování:

- Automatické sekvenční individuální osazování – zařízení pro tato osazování jsou nejrozšířenější. Pracují na principu „pick and place“ (uchop a vlož). Stroje pro toto osazování vezmou ze zásobníku součástku a tu poté osadí na DPS. Výhodou těchto strojů je univerzálnost, takže jsou kompatibilní s řadou součástek a případné přenastavení není zdlouhavé. Zásobníky pro tento způsob osazování jsou uzpůsobeny v podstatě všem součástkám. Mezi potenciální nevýhody tohoto zařízení je poměrně pomalé osazování v porovnání s jinými zařízeními, ale i tak se lze běžně dostat na osazení několika tisíců součástek za hodinu.
- Automatické simultánní osazování – tato technologie je směřovaná takovým směrem, aby osazování jednotlivých součástek probíhalo v co nejkratší možné době. Díky této technologii se lze běžně dostat na 300 000 osazených součástek za hodinu. Důvodem, proč je rychlost tak vysoká, je osazování více součástek najednou. Hlava bere ze zásobníků několik součástek, které už v zásobnících musí mít takovou prostorovou konfiguraci jako na osazované DPS. Využití těchto strojů je zejm. tam, kde se osazuje obrovské množství stejných motivů DPS. Osazovací hlava musí být uzpůsobená pro každý motiv individuálně, takže její nastavení zabere spoustu času.
- Automatické sekvenční / simultánní osazování – je kombinace obou výše uvedených způsobů. Tento způsob je vhodný tam, kde je ve velké sérii výrobků použita stejná konfigurace součástek, ovšem s drobnými změnami. Pak tato skupina je osazována metodou simultánního osazování a ta část, která se při různých sériích liší, je osazována sekvenčně. Pro celý tento proces existuje jedno automatizované zařízení, ovšem přístupná je vždy jen jedna osazovací pozice. Osazovací hlavy a osazovaná deska se vůči sobě pohybují v pravých úhlech. Touto technologií lze osadit přibližně 70 000 součástek za hodinu, ovšem je to závislé na konkrétní DPS [2].

4.4. Metody a moderní technologie pájení

4.4.1. Pájení vlnou

Pájení vlnou patří mezi poměrně rozšířenou technologii pájení. Jedna z jejích předností je, že se dají pájet jak vývodové součástky, tak i SMD součástky najednou (jsou-li kontakty součástek s drátovými vývody na stejné straně desky jako SMD součástky). Princip je založený na posuvu desky po dopravníku, na němž je deska umístěná. V úvodní části je nutná deoxidace desky, pak následuje předehřev, který desku předehřeje na teplotu asi 100°C, aby deska při samotném pájení nemusela čelit obrovskému nárůstu teploty. Pak probíhá samotné pájení, kde vlna tvořená roztavenou pájkou zapájá desku při teplotě asi 260°C. Tato metoda se zejména používala pro pájení součástek s vývody.

Pro technologii pájení vlnou je potřeba brát v úvahu tyto technologické zásady:

- Součástky musí vydržet po dobu 10 s teplotu 260 °C, která vzniká u tohoto druhu pájení.
- Výběr vhodných součástek pro tuto technologii pájení tj. rezistory v pouzdrech MELF a MINIMELF.
- Minimální rozteč vývodů u pouzder SOT, SOD a SOP 0,65 mm až 0,4 mm, závisí to na druhu pájení, pájecí vlně a tavidlu.
- Konektory a konstrukční prvky upravit tak, aby pájka nevnikla do jejich dutin.
- Vhodné rozložení plošných vodičů co nejvíce ve směru pohybu po vlně (platí pokud není použita na desce nepájivá maska).
- Limitace maximální výšky součástek závislá na druhu vlny, tento rozměr je uváděn asi 10 mm.
- Neumísťovat pod SMD součástky pokovené otvory.
- Uvažovat riziko tzv. Stínového efektu a v důsledku toho správně navrhovat nejen velikosti plošek, ale také jejich mezery, aby nedocházelo ke zkratům pájkou mezi ploškami [2].

4.4.2. Pájení přetavením

Pájení přetavením je významná technologie moderní doby. Tato technologie je bezkontaktní, takže při pájení nedochází k přímému styku pájecího nástroje a kontaktů. Díky tomu lze tuto technologii použít pro náročné aplikace na přesnost, kde jsou malé plošky, malé rozteče mezi vývody apod. Před samotným pájením je nutné osadit SMD součástky do pájecí pasty (viz kapitola 4.3.1). Následně se DPS vloží do přetavovací pece, kde působením tepelné energie dojde k roztavení pájecí pasty a tím i kvalitní zapájení součástek. Jelikož pájecí pasta je velmi drahá, asi 10x dražší než stejné množství pájky v tyčích, je nutné uvážit, kdy tuto technologii využít [2].

Pájení přetavením využívá tyto technologie:

- pájení v parách
- přetavení infračerveným zařízením
- nucené proudění
- pájení ostřeným proudem horkého vzduchu
- pájení laserem

4.4.2.1. *Pájení v parách*

Princip činnosti této metody spočívá v umístění DPS do místa, kde se vypařuje kapalina. Pára má vysokou teplotu a její kondenzace na chladných místech DPS zaručuje roztavení pájecí pasty a tím i zapájení součástek. Pájecí zařízení musí být dokonale utěsněno, aby z něj pára neunikala do okolí. Pro pájení se používají fluórouhliky, které mají teplotu varu 215 nebo 250 °C. Konstantní teplotu pro pájení zaručuje bod varu kapaliny. V celém prostoru pájení je rozložení teploty rovnoměrné. Mezi základní vlastnosti, které musí mít používané kapaliny, patří: vysoký bod vzplanutí, chemická a tepelná stabilita, definovaný bod varu a hustota páry vyšší než je hustota vody [2].

Výhody pájení v parách jsou:

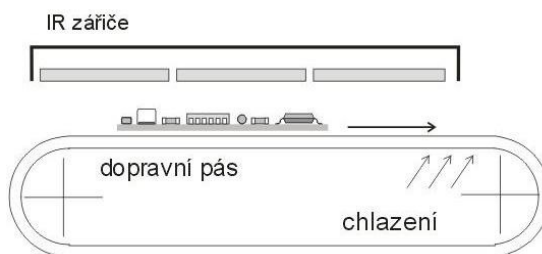
- poměrně rychlý ohřev
- rovnoměrné zahřívání
- rovnoměrné rozložení tepla v pájecí zóně
- jde o hromadný proces pájení
- při pájení nedochází k oxidaci
- je možné pájet s tavidlem, které má nízký obsah pevných látek
- nemůže dojít k překročení mezní teploty
- součástky pro pájení nejsou rozměrově omezeny

Naopak mezi nevýhody patří:

- k dispozici je omezené množství teplot pro pájení
- kapalina je drahá
- v průběhu pájecího procesu se kapalina ztrácí [2]

4.4.2.2. Přetavení infračerveným zářením

Kterákoliv část elektromagnetického spektra je schopna zahřát těleso svou vyzařovanou energií a právě na tomto principu je založena technologie pájení přetavením infračerveným zářením. V praxi se používá omezené spektrum vlnových délek v rozsahu $0,1 \div 100 \mu\text{m}$. Tento rozsah v sobě zahrnuje některé složky ultrafialového záření, viditelné světlo a složky infračerveného záření. Zářiče se používají wolframové. Mezi výhody patří jednoduchá konstrukce pece, pásmové ovládání ve značném rozsahu teplot a nízká setrvačnost teploty DPS. Na obr. 4.8 je znázorněn model této přetavovací pece [2].



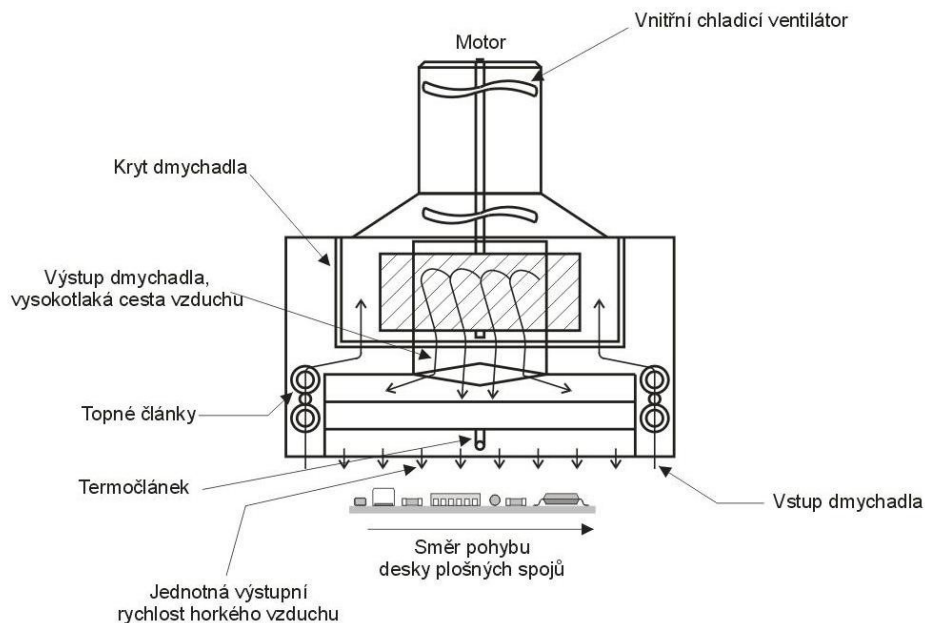
Obr. 4.8 – Model přetavovací pece technologie infračerveného záření

Pohlcování tepla součástkami je rozdílné a je ovlivňováno tepelnou hmotou, vlnovou délkou záření a barvou součástek. Tmavé součástky se zahřívají rychleji než pájecí pasta, v důsledku toho jsou vystavovány působení vyšších teplot. Pokud je pájený spoj umístěn za některou velkou součástku, může dojít k jeho nedokonalému zapájení. Předejít se tomu dá pouze správným návrhem DPS [2].

4.4.2.3. Nucené proudění

Jedna z nejvíce používaných technologií je přetavování nuceným prouděním. Tato technologie kompenzuje nevýhody přetavení infračerveným zářením. Primární zdroj tepla pracuje s vyššími teplotami než tepelný zářič, ohřívá plyn, který výkonné ventilátory vhánějí do pece. Regulace teploty je závislá na době přetavení tzn. čím déle je DPS v peci, tím její teplota

pro přetavení roste. Kvalitní přetavovací pec se vyznačuje tím, že je po celé její délce a hlavně šířce tunelu stejná teplota. Na *obr. 4.9* je znázorněn princip této přetavovací pece [2], [11].

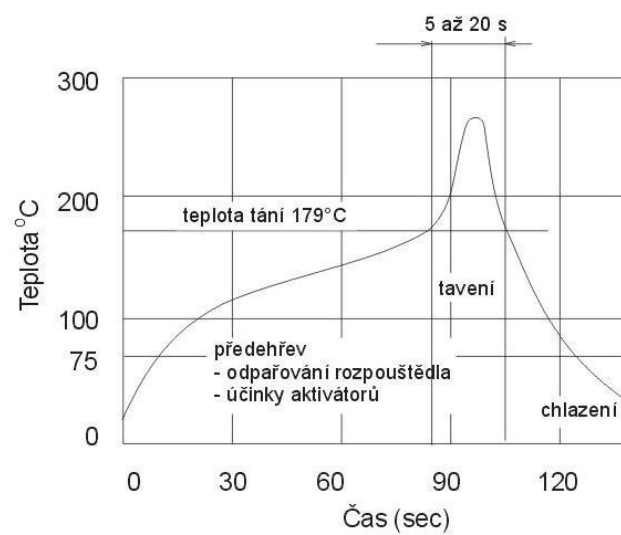


Obr. 4.9 – Přetavovací pec pro technologii nuceného proudění [11]

Mezi výhody této technologie patří:

- nižší pořizovací náklady
- vysoký výkon
- necitlivost k barvám
- přesné řízení teploty
- nezávislost rozmístění součástek na DPS

Jedinou nevýhodu, kterou tato technologie má, je delší doba pájení ve srovnání s jinými technologiemi. Každá deska se liší z hlediska použitých materiálů, pájecí pasty, velikosti povrchu, množstvím součástek atd. Je proto nutné teplotní profil vždy odzkoušet. Obecná charakteristika teplotního profilu je naznačena na *obr. 4.10* [2], [11].



Obr. 4.10 – Teplotní profil pro pájení přetavením nuceným prouděním [11]

Závěr

Desky plošných spojů představují v současné době neodmyslitelnou součást každého zařízení. V současnosti je zaměření směřováno výhradně na SMT technologii. SMT technologie obsahuje velmi významné výhody, které jsou už několik let klíčové ve většině aplikací. Od svého vzniku je vývoj SMT technologie rok od roku pokročilejší a jinak tomu nebude ani v nadcházejících letech. Důvodů, proč se touto technologií zabývat nadále, je mnoho a využití už jen v samotné komerční elektronice je obrovské. Trendem současné doby je postupné zlevňování zařízení komerční elektroniky. Jedním z důvodů, proč to tak je, patří vysoké ekonomické nároky na výrobu DPS a její osazení. Deska plošných spojů představuje ve většině zařízení její nejdražší součást, proto technicko-ekonomické požadavky na její výrobu, použité technologie výroby a materiály bude potřeba volit efektivněji. Mezi hlavní cíle, na které je potřeba zaměřit se při výrobě všech zařízení, je zrychlení doby výroby DPS včetně osazení. Tento směr má současná technologie už několik let a za několik let se toho změnilo mnoho, jsou to např. technologie vrtání, leptání, povrchová úprava, osazování, apod. Plošné spoje mají nyní také velký počet vrstev a hlavně vysokou míru integrace, která sahá až na limity funkčnosti, protože při takto vysoké integraci vzniká problém s odvodem tepla. Moderní řešení tohoto problému je v aplikaci jiných materiálů například AIN, který má tepelnou vodivost blízkou kovům a zároveň je to výborný elektrický izolant. Oblastí vývoje nových technologií v této části elektroniky je více, všechny ale mají společné čím dál tím větší nároky na technicko-ekonomické požadavky.

Seznam použité literatury

- [1] Abel, M.: *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. 1. vyd. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902733-2-7.
- [2] Abel, M.: *SMT Technologie povrchové montáže*. 1. vyd. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902733-1-9.
- [3] Mach, P. – Skočil, V. – Urbánek, J.: *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [4] Šandera, J.: *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-181-0.
- [5] Šavel, J.: *Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4. vyd. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-190-X.
- [6] Záhlava, V.: *Návrh a konstrukce DPS: Principy a pravidla praktického návrhu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [7] www.gme.cz
- [8] www.norte.cz
- [9] www.pcb.gatema.cz
- [10] www.printed.cz
- [11] www.smtcentrum.cz